

长春地层地铁隧道施工的 Peck 公式改进*

郑馨,麻凤海

(大连大学 建筑工程学院,辽宁 大连 116622)

摘 要:Peck 利用高斯方程提出预测地铁隧道开挖引起的地表位移的方法是目前众多经验方法中最为简便也是应用最为广泛的方法,但这一公式具有相应的局域性,对不同地区的适用性尚未有明确结论。本文以长春地区地铁隧道开挖施工为研究实例,通过对施工过程中大量地表沉降实测数据进行分析,利用线性回归的数学方法,引入两个修正系数:地表最大沉降修正系数 α 、沉降槽宽度修正系数 β ,对在长春地区地质条件下由地铁隧道施工引起的地表沉降进行分析研究。结果表明:长春地铁一号线施工区绝大部分实测地表沉降数据都可以较好的进行高斯分布拟合,且当 α 介于0.3~0.7之间、 β 介于0.6~1.0之间,Peck 公式改进后所绘曲线更接近地表实测沉降数据,使预测效果更好。

关键词: 地铁;地表沉降;Peck 公式;回归分析;修正系数

中图分类号:U451 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2017)03-0732-05

Improvement of Peck Formula in Subway Construction in Changchun

Zheng Xin, Ma Fenghai

(College of Civil and Architectural Engineering, Dalian University, Dalian, Liaoning 116622, P.R. China)

Abstract: Gaussian equation suggested by Professor Peck is one of the most popular-used methods to predict the soft ground movement induced by shallow tunneling work. This formula is based on the measured data presented in a limited area. This paper takes a lot of ground subsidence measured data in Changchun subway tunnel foundation excavation, combined with the application of mathematical methods of least squares linear regression method. Two correction factors were introduced: the maximum surface subsidence correction coefficient α and the width of settlement trough correction factor β . As is found, curve plotted with the measured surface subsidence curve fitting formula after Peck approximate match, indicating that the use of linear regression fit the measured data of surface deformation curve to predict the formation of ground subsidence caused by metro tunnel construction is feasible. Through regression analysis, a more accurate prediction curve can be obtained when α is between 0.3~0.7 and β is between 0.6~1.0.

Keywords: subway; surface subsidence; Peck formula; regression analysis; correction factor

0 引言

随着我国城市地铁工程建设地迅速发展,地下交通项目不断增多。但在地铁隧道施工过程中,因地铁隧道开挖或多或少会扰动土体,使得地层发生位移及变形,当土体扰动引起的位移及变形超过一

定的限度时,将导致周边建(构)筑物、道路、管道、线路等的变形和破坏,引发岩土环境出现系列问题。目前,国内外针对地下工程施工引起地表沉降的预测所采用的方法主要有经验公式法、模型试验法、理论解析法、数值模拟法、专家系统和灰色理论等。经验公式法简单实用,是预测由地下开挖施

* 收稿日期:2016-08-27(修改稿)
作者简介:郑馨(1989-),女,浙江杭州人,硕士生,主要从事地下工程方面的研究。E-mail:jasmine150@163.com
基金项目:国家自然科学基金(51174038)

工引起地层位移及变形的首选方法之一,也是应用最广泛的方法^[1]。Peck 经验公式由于其具有区域局限性,应针对不同的工程背景进行相应的改进,以使其预测结果更准确。本文充分考虑长春地区的地质特点,同时结合长春地铁一号线大量实测数据,利用线性回归分析法,改进 Peck 经验公式优化预测效果,使其适用于长春地区的地质条件。

1 Peck 经验公式理论

Peck 于 1969 年提出地层损失的概念,并给出因隧道开挖引起地表沉降的预测方法。他提出,隧道开挖所形成的地表沉降槽在不排水情况下的体积应等于地层损失的体积。假定在隧道开挖方向上地层损失均匀分布,Peck 提出横向地表沉降槽近似呈正态高斯分布的概念,即 Peck 曲线^[2]。据此理论,提出了地表沉降分布的预计公式^[3]:

$$S(x) = S_{\max} e^{\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right)} \tag{1}$$

$$S_{\max} = \frac{V_i}{\sqrt{2\pi}i} \approx \frac{V_i}{2.5i} \tag{2}$$

式中: $S(x)$ 为距隧道中心 x 处的地表沉降,mm; S_{\max} 为隧道中心处沉降量的最大值,mm; x 为距隧道中心的水平距离,m; V_i 为隧道单位长度上的地层损失, m^3/m ; i 为沉降槽的宽度系数,m。

2 实测数据回归分析

2.1 回归分析方法

对长春地铁一号线大量实测数据进行分析,实测沉降数据无法绘制成一条光滑曲线。而将实测沉降数据通过比对对应测点距隧道轴线的距离,可以发现他们有一一对应的关系。因此,实测沉降数据可以通过一元线性回归分析的方法,拟合成一条曲线。由于 Peck 经验公式是一个非线性函数,故对原始 Peck 公式进行对数运算,可得:

$$\ln S(x) = \ln S_{\max} + \frac{1}{i^2} \times \left(-\frac{x^2}{2}\right) \tag{3}$$

令 $\hat{y} = \ln S(x)$, $\hat{a} = \ln S_{\max}$, $\hat{b} = \frac{1}{i^2}$, 可将式(3)转化为:

$$\hat{y} = \hat{a} + \hat{b} \times \left(-\frac{x^2}{2}\right) \tag{4}$$

式中: \hat{a} 为回归后常数项; \hat{b} 为回归后线性系数。

以 $\ln S(x)$ 和 $\frac{-x^2}{2}$ 作为线性回归变量分析,回归后的常数项为 $\ln S_{\max}$, 回归后线性系数 $\frac{1}{i^2}$ 。回归计算为:

$$S_{xx} = \sum \left(\frac{-x_i^2}{2}\right)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum \frac{-x_i^2}{2}\right)^2 \tag{5}$$

$$S_{xy} = \sum \left[\left(\frac{-x_i^2}{2}\right) \ln S(x_i)\right] - \frac{1}{n} \sum \left(\frac{-x_i^2}{2}\right) \sum \ln S(x_i) \tag{6}$$

$$S_{yy} = \sum \ln^2 S(x_i) - \frac{1}{n} \left[\sum \ln S(x_i)\right]^2 \tag{7}$$

$$\hat{b} = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \tag{8}$$

$$\hat{a} = \overline{\ln S(x_i)} - \hat{b} \overline{\left(-\frac{x_i^2}{2}\right)} \tag{9}$$

式中: x_i 是所选样本里第 i 个样本点距隧道轴线的代数值; n 是样本点个数。

通过回归计算后得:

$$S_{\max} = e^{\hat{a}} \tag{10}$$

$$i = 1/\left(\hat{b}\right)^{0.5} \tag{11}$$

回归曲线为:

$$S(x) = e^{\hat{a} - \frac{\hat{b}x^2}{2}} \tag{12}$$

用线性相关系数 R 检验回归分析后得到的 Peck 公式的线性相关程度。

$$R = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}} \times \sqrt{S_{yy}}} \tag{13}$$

当 $R > r_{0.01}(n-2)$ 时,认为线性回归后的 Peck 公式的线性关系高度显著;当 $r_{0.01}(n-2) > R > r_{0.05}(n-2)$ 时,认为线性回归后的 Peck 公式线性关系显著^[4-5]。

2.2 典型工程实例分析对比

以长春地铁一号线盾构区间开挖施工为工程背景,地质条件由上至下分别为:杂填土(Q^{4ml4})、粉质粘土($Q^{2al+ql4}$)、粗砂、全风化泥岩和强风化泥岩等。根据长春地铁一号线地质资料,选取 4 个典型区间断面,对实测沉降数据进行回归分析,并绘制 Peck 拟合曲线^[6]以进行对比,对比图见图 1~4。

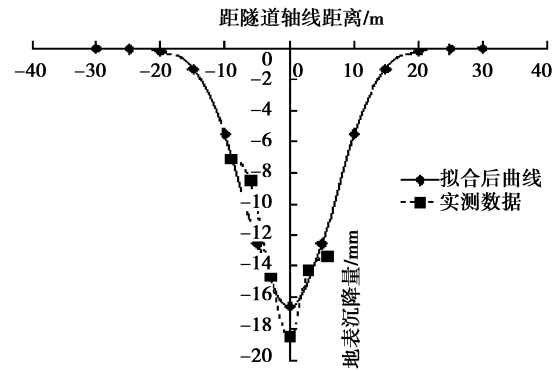


图 1 断面 1 对比图
Fig.1 Contrast of section 1

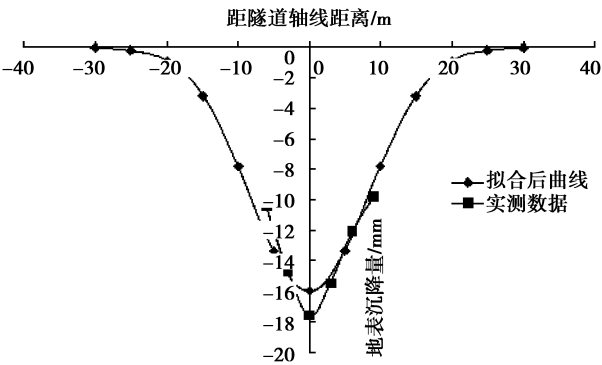


图 2 断面 2 对比图
Fig.2 Contrast of section 2

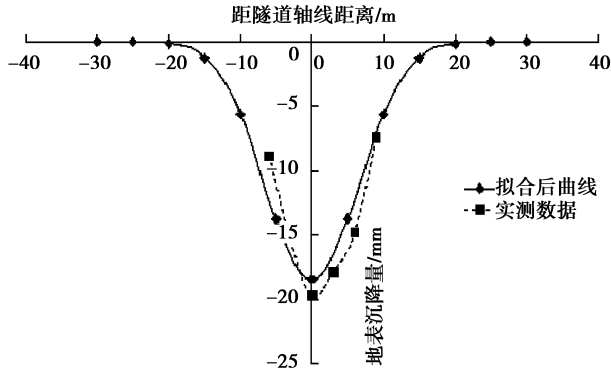


图 3 断面 3 对比图
Fig.3 Contrast of section 3

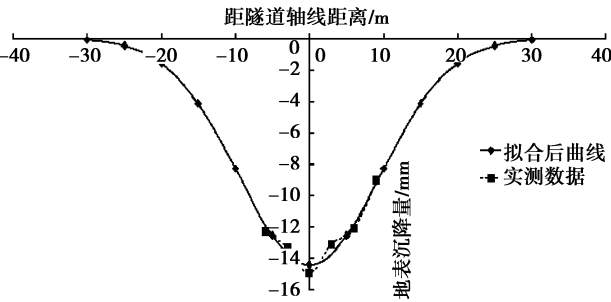


图 4 断面 4 对比图
Fig.4 Contrast of section 4

从图中可以看到,Peck 公式拟合后的曲线与实测地表沉降量绘出的曲线近似吻合,说明利用线性回归法拟合实测地表变形数据形成曲线来预测地铁隧道施工引起的地表沉降是可行的。但是拟合后的曲线与实测数据形成的曲线仍存在一定差异,其原因是可能是复杂的地质条件、施工工法等因素。故而改进 Peck 公式,使之适用于研究与分析长春地区地质条件下隧道开挖引起地表沉降的规律^[7-10]。

3 Peck 公式改进

3.1 引入修正系数改进 Peck 公式

由于 Peck 原始公式无法对长春地区地铁隧道开挖引起的地表沉降进行较为精准地预测,现对公式中地表最大沉降量和沉降槽宽度进行修正,引入修正系数 α 、 β ,改进后的 Peck 公式如下

$$S(x) = \alpha S'_{\max} e^{\left(\frac{-x^2}{2(\beta i')^2}\right)} \quad (14)$$

式中: S'_{\max} 为原始 Peck 公式中的地表最大沉降量, mm; i' 为原始 Peck 公式中的沉降槽宽度, m; α 为地表最大沉降修正系数; β 为沉降槽宽度修正系数。

对式 (14) 等号两边分别取对数,转换为线性函数得

$$\ln S(x) = \ln(\alpha S'_{\max}) + \frac{1}{(\beta i')^2} \times \left(\frac{-x^2}{2}\right) \quad (15)$$

以断面 1 为例,回归后线性函数为

$$\ln S(x) = 2.807\ 12 + 0.022\ 02 \times \left(\frac{-x^2}{2}\right) \quad (16)$$

可得 $\alpha = \frac{e^a}{S'_{\max}}$, $\beta = \frac{1}{i'(\hat{b})^{0.5}}$, 则断面 1 的 Peck 公

式修正系数 α 为 0.473 2, β 为 0.999 8。

根据上述改进方法,在长春地铁一号线隧道施工实际工程中,选取 5 个区间隧道施工的 30 个断面的实测数据进行分析计算,得到不同的修正系数,并将数据进行分区汇总(如表 1)。

从表 1 可以得到以下结论: α 在 0.3~0.7 区间、 β 在 0.6~1.0 区间取值,改进后的 Peck 公式可以更为准确地预测长春地铁隧道开挖施工引起的地表沉降。

表 1 修正系数分布表

Table 1 Distribution of correction factor				
分布区间	α 分布	α 分布	β 分布	β 分布
	样本数	/%	样本数	/%
0.3~0.4	11	36.7	1	3.3
0.4~0.5	5	16.7	2	6.7
0.5~0.6	7	23.3	1	3.3
0.6~0.7	3	10	4	13.3
0.7~0.8	1	3.3	6	20
0.8~0.9	2	6.7	5	16.7
0.9~1.0	1	3.3	11	36.7

3.2 检验修正系数

选取 α 、 β 两个修正系数上限值 0.7、1.0 组合和下限值 0.3、0.6 组合进行检验,则非限值修正系数任意组合所得改进后预测曲线都在限值修正系数对应预测曲线范围内。在 BH、FR 两个典型区间各选取 4 组实测数据进行验证,如图 5、图 6 所示。

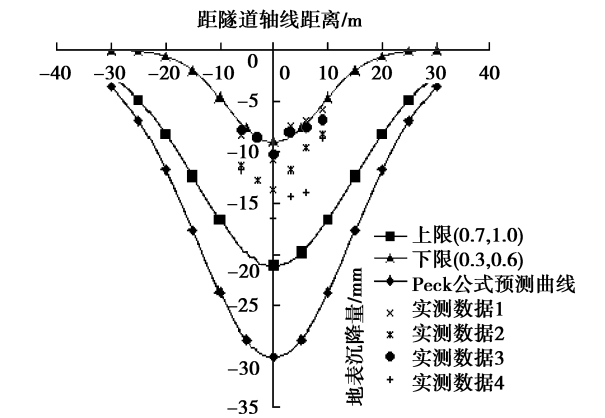


图 5 BH 区间改进后 Peck 曲线与实测数据对比图

Fig.5 Comparison of the amended Peck curve with the measured data in BH section

从图 5、图 6 可知,大部分实测数据位于上限与下限曲线之间,表明改进后的曲线与实测数据更吻合,说明利用改进后的 Peck 公式来预测长春地区及与该地区地质条件、工况相近的工程施工引发的地表沉降是可行的。即对于 Peck 公式进行地表最大沉降和沉降槽宽度的改进,且修正系数 α 取值 0.3~0.7 之间、 β 取值 0.6~1.0 之间时,所预测地表沉降量的精度较高。

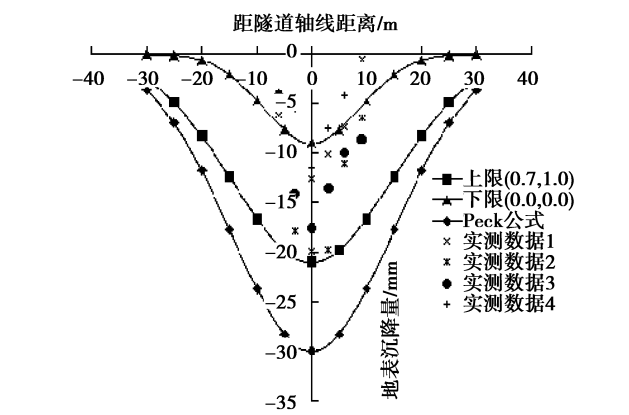


图 6 FR 区间改进后 Peck 曲线与实测数据对比图

Fig.6 The comparison chart of the amended Peck curve with the measured data in FR section

4 结论

根据对本文搜集的 30 多组实测长春地区地铁隧道施工引起地表沉降数据的分析,得出以下初步结论:

- (1) 长春地铁一号线绝大部分实测数据都可以较好地进行高斯分布拟合。整体上看,在整个长春地区隧道施工范围内,即使地质条件有所差异、施工工法有所不同,瞬时实测地表沉降曲线都基本符合高斯分布规律。
- (2) 在长春地区地质条件下,对 Peck 经验公式中参数进行修正,得出当 α 介于 0.3~0.7 之间、 β 介于 0.6~1.0 之间时,改进后 Peck 曲线更贴近工程实测沉降数据。

参考文献 (References)

[1] 韩焯,李宁,Standing J R. Peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J].岩土力学,2007,28(1):23-28. (Han Xuan, Li Ning, Standing J R. Peck formula in the tunnel of the applicability of ground deformation prediction analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 23-28. (in Chinese))

[2] Peck R B. Deep excavation and tunneling in soft ground[A] // Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering[C]. Mexico, 1969: 225-290.

[3] 王霆,刘维宁,张成,等.地铁车站浅埋暗挖法施工引起地表沉降规律研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(9):1855-1861. (Wang Ting, Liu Weining, Zhang Cheng, et al. Regularity of surface subsidence subway station construction method caused shallow[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1855-1861. (in Chinese))

- [4] 滕素珍,冯敬海.数理统计学[M].大连:大连理工大学出版社,2005.(Teng Suzhen, Feng Jinghai. Mathematical statistics [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2005. (in Chinese))
- [5] 陈明,陈子毅,汪嘉冈.数理统计讲义[M].上海:复旦大学出版社,2006.(Chen Ming, Chen Ziyi, Wang Jiagang. Mathematical statistics lecture [M]. Shanghai: Fudan University Press, 2006. (in Chinese))
- [6] 闫海生.典型地质条件下地铁施工引起地表沉降规律的研究[D].太原:太原理工大学,2011.(Yan Haisheng. Surface subsidence rule of typical geological conditions caused by subway construction research [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [7] 王金明.地铁隧道施工引起的地表沉降及变形研究[D].长沙:中南大学,2009.(Wang Jinming. Subway tunnel construction surface subsidence and deformation studies [D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese))
- [8] 姚宣德,王梦恕.地铁浅埋暗挖法施工引起的地表沉降控制标准的统计分析[J].岩石力学与工程学报,2006, 25(10): 2030-2035. (Yao Xuande, Wang Mengshu. Statistical analysis of shallow tunneling method subway construction caused surface subsidence control standards [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2030-2035. (in Chinese))
- [9] 姚爱军,赵强,管江,等.基于北京地层地铁隧道施工的Peck的公式改进[J].地下空间与工程学报,2010, 6(4): 789-793. (Yao Aijun, Zhao Qiang, Guan Jiang, et al. Based on Beijing subway tunnel construction Peck formation formula improvements [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(4): 789-793. (in Chinese))
- [10] 杨清源,麻凤海,胡国栋,等.大连地铁隧道施工的Peck公式改进[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2012, 31(2): 159-162. (Yang Qingyuan, Ma Fenghai, Hu Guodong, et al. Improvement of Peck formula in subway construction under typical geological conditions [J]. Journal of Liaoning University of Engineering and Technology (Natural Science), 2012, 31(2): 159-162. (in Chinese))

(上接第716页)

- [5] He M C, Gong W L, Li D J, et al. Physical modeling offailure process of the excavation in horizontal strata based on IR thermography [J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(6): 689-698.
- [6] 张爽,刘庆新,胡力耀,等.广巴高速某隧道不同岩性围岩变形特征分析[J].现代隧道技术,2011, 48(1): 17-21. (Zhang Shuang, Liu Qingxin, Hu Liyao, et al. Analysis on the rock deformations of a tunnel on Guangyuan-Bazhong Expressway [J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(1): 17-21. (in Chinese))
- [7] 李晓红,夏彬伟,李丹,等.深埋隧道层状围岩变形特征分析[J].岩土力学,2010, 31(4): 1163-1167. (Li Xiaohong, Xia Binwei, Li Dan, et al. Deformation characteristics analysis of layered rockmass in deep buried tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1163-1167. (in Chinese))
- [8] 赵旭峰,王春苗,孔祥利.深部软岩隧道施工性态时空效应分析[J].岩石力学与工程学报,2007, 26(2): 404-409. (Zhao Xufeng, Wang Chunmiao, Kong Xiangli. Analysis of time-space effects of construction behavior of deep soft rock tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 404-409. (in Chinese))
- [9] 刘志春,李文江,朱永全,等.挤压性围岩隧道大变形机理及分级标准研究[J].岩土工程学报,2008, 30(5): 690-697. (Liu Zhichun, Zhu Yongquan, Li Wenjiang, et al. Mechanism and classification criterion for large deformation of squeezing ground tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(5): 690-697. (in Chinese))
- [10] 刘芸,周玉兵.软岩小净距隧道中夹岩柱分区及加固方法研究[J].地下空间与工程学报,2013, 9(2): 373-379. (Liu Yun, Zhou Yubin. Study on partition and reinforcement method of middle rock pillar in soft rock tunnel with small clear distance [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(2): 373-379. (in Chinese))
- [11] 刘志春,李文江,朱永全,等.软岩大变形隧道二次衬砌施作时机探讨[J].岩石力学与工程学报,2008, 27(3): 580-588. (Liu Zhichun, Li Wenjiang, Zhu Yongquan, et al. Research on construction time of secondary lining in soft rock of large- deformation tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 580-588. (in Chinese))
- [12] 洪开荣,杨朝帅,李建华.超前支护对软岩隧道空间变形的影响分析[J].地下空间与工程学报,2014, 10(2): 429-433, 440. (Hong Kairong, Yang Chaoshuai, Li Jianhua. Analysis on impact of advanced support on space deformation of tunnel in soft rock mass [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(2): 429-433, 440. (in Chinese))